

# 半导体物理学题库

Prepared on 21 November 2021

1. 能带中载流子的有效质量反比于能量函数对于波矢的\_\_\_\_\_, 引入有效质量的意义在于其反映了晶体材料的\_\_\_\_\_的作用。(二阶导数, 内部势场)
2. 半导体导带中的电子浓度取决于导带的\_\_\_\_\_ (即量子态按能量如何分布) 和 \_\_\_\_\_ (即电子在不同能量的量子态上如何分布)。(状态密度, 费米分布函数)
3. 两种不同半导体接触后, 费米能级较高的半导体界面一侧带\_\_\_\_\_电, 达到热平衡后两者的费米能级\_\_\_\_\_。(正, 相等)
4. 半导体硅的价带极大值位于空间第一布里渊区的中央, 其导带极小值位于\_\_\_\_\_方向上距布里渊区边界约 0.85 倍处, 因此属于\_\_\_\_\_半导体。([100], 间接带隙)
5. 间隙原子和空位成对出现的点缺陷称为\_\_\_\_\_; 形成原子空位而无间隙原子的点缺陷称为\_\_\_\_\_。(弗仑克尔缺陷, 肖特基缺陷)
6. 在一定温度下, 与费米能级持平的量子态上的电子占据概率为\_\_\_\_\_, 高于费米能级  $2kT$  能级处的占据概率为\_\_\_\_\_。(1/2,  $1/1+\exp(2)$ )
7. 从能带角度来看, 锗、硅属于\_\_\_\_\_半导体, 而砷化镓属于\_\_\_\_\_半导体, 后者有利于光子的吸收和发射。(间接带隙, 直接带隙)
8. 通常把服从\_\_\_\_\_的电子系统称为非简并性系统, 服从\_\_\_\_\_的电子系统称为简并性系统。(玻尔兹曼分布, 费米分布)
9. 对于同一种半导体材料其电子浓度和空穴浓度的乘积与\_\_\_\_\_有关, 而对于不同的半导体材料其浓度积在一定的温度下将取决于\_\_\_\_\_的大小。(温度, 禁带宽度)
10. 半导体的晶格结构式多种多样的, 常见的 Ge 和 Si 材料, 其原子均通过共价键四面体相互结合, 属于\_\_\_\_\_结构; 与 Ge 和 Si 晶格结构类似, 两种不同元素形成的化合物半导体通过共价键四面体还可以形成\_\_\_\_\_和纤锌矿等两种晶格结构。(金刚石, 闪锌矿)
11. 如果电子从价带顶跃迁到导带底时波矢  $k$  不发生变化, 则具有这种能带结构的半导体称为\_\_\_\_\_禁带半导体, 否则称为\_\_\_\_\_禁带半导体。(直接, 间接)
12. 半导体载流子在输运过程中, 会受到各种散射机构的散射, 主要散射机构有\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_、中性杂质散射、位错散射、载流子间的散射和等价能谷间散射。(电离杂质的散射, 晶格振动的散射)
13. 半导体中的载流子复合可以有很多途径, 主要有两大类: \_\_\_\_\_的直接复合和通过禁带内的\_\_\_\_\_进行复合。(电子和空穴, 复合中心)
14. 反向偏置 pn 结, 当电压升高到某值时, 反向电流急剧增加, 这种现象称为 pn 结击穿, 主要的击穿机理有两种: \_\_\_\_\_击穿和\_\_\_\_\_击穿。(雪崩, 隧道)
15. \_\_\_\_\_杂质可显著改变载流子浓度; \_\_\_\_\_杂质可显著改变非平衡载流子的寿命, 是有效的复合中心。(浅能级, 深能级)

## 二. 选择题

1. 本征半导体是指 ( A ) 的半导体。  
A. 不含杂质和缺陷                      B. 电阻率最高  
C. 电子密度和空穴密度相等            D. 电子密度与本征载流子密度相等
2. 如果一半导体的导带中发现电子的几率为零, 那么该半导体必定 ( D )。  
A. 不含施主杂质                          B. 不含受主杂质  
C. 不含任何杂质                          D. 处于绝对零度
3. 有效复合中心的能级必靠近 ( A )。  
A. 禁带中部    B. 导带    C. 价带    D. 费米能级

4. 对于只含一种杂质的非简并 n 型半导体, 费米能级  $E_F$  随温度上升而 ( D )。
- A. 单调上升 B. 单调下降  
C. 经过一个极小值趋近  $E_i$  D. 经过一个极大值趋近  $E_i$
5. 当一种 n 型半导体的少子寿命由直接辐射复合决定时, 其小注入下的少子寿命正比于 ( A )。
- A.  $1/n_0$  B.  $1/\Delta n$  C.  $1/p_0$  D.  $1/\Delta p$
6. 在 Si 材料中掺入 P, 则引入的杂质能级 ( B )。
- A. 在禁带中线处 B. 靠近导带底 C. 靠近价带顶 D. 以上都不是
7. 公式  $\mu = q\tau/m^*$  中的  $\tau$  是半导体载流子的 ( C )。
- A. 迁移时间 B. 寿命  
C. 平均自由时间 D. 扩散时间
8. 对于一定的 n 型半导体材料, 温度一定时, 减少掺杂浓度, 将导致 ( D ) 靠近  $E_i$ 。
- A.  $E_c$  B.  $E_v$   
C.  $E_g$  D.  $E_F$
9. 在晶体硅中掺入元素 ( B ) 杂质后, 能形成 N 型半导体。
- A. 锗 B. 磷 C. 硼 D. 锡
10. 对大注入条件下, 在一定的温度下, 非平衡载流子的寿命与 ( D )。
- A. 平衡载流子浓度成正比 B. 非平衡载流子浓度成正比  
C. 平衡载流子浓度成反比 D. 非平衡载流子浓度成反比
11. 重空穴是指 ( C )。
- A. 质量较大的原子组成的半导体中的空穴  
B. 价带顶附近曲率较大的等能面上的空穴  
C. 价带顶附近曲率较小的等能面上的空穴  
D. 自旋-轨道耦合分裂出来的能带上的空穴
12. 电子在导带能级中分布的概率表达式是 ( C )。
- A.  $\exp(-\frac{E_D - E_c}{k_0 T})$  B.  $\exp(-\frac{E_c - E_D}{k_0 T})$  C.  $\exp(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T})$  D.  $\exp(-\frac{E_F - E_c}{k_0 T})$
13. 如在半导体中以长声学波为主要散射机构是, 电子的迁移率  $\mu_n$  与温度的 ( B )。
- A. 平方成正比 B.  $\frac{3}{2}$  次方成反比  
C. 平方成反比 D.  $\frac{3}{2}$  次方成正比
14. 把磷化镓在氮气氛中退火, 会有氮取代部分的磷, 这会在磷化镓中出现 ( D )。
- A. 改变禁带宽度 B. 产生复合中心  
C. 产生空穴陷阱 D. 产生等电子陷阱
15. 一般半导体器件使用温度不能超过一定的温度, 这是因为载流子浓度主要来源于 \_\_\_\_\_, 而将 \_\_\_\_\_ 忽略不计。 ( A )
- A. 杂质电离, 本征激发 B. 本征激发, 杂质电离  
C. 施主电离, 本征激发 D. 本征激发, 受主电离

16. 一块半导体寿命  $\tau = 15 \mu s$ ，光照在材料中会产生非平衡载流子，光照突然停止  $30 \mu s$  后，其中非平衡载流子将衰减到原来的（ C ）。
- A.  $1/4$       B.  $1/e$       C.  $1/e^2$       D.  $1/2$
17. 半导体中由于浓度差引起的载流子的运动为（ B ）。
- A. 漂移运动    B. 扩散运动    C. 热运动      D. 共有化运动
18. 硅导带结构为（ D ）。
- A. 位于第一布里渊区内沿 $\langle 100 \rangle$ 方向的 6 个球形等能面  
B. 一半位于第一布里渊区内沿 $\langle 111 \rangle$ 方向的 6 个球形等能面  
C. 一半位于第一布里渊区内沿 $\langle 111 \rangle$ 方向的 8 个椭球等能面  
D. 位于第一布里渊区内沿 $\langle 100 \rangle$ 方向的 6 个椭球等能面
19. 杂质半导体中的载流子输运过程的散射机构中，当温度升高时，电离杂质散射的概率和晶格振动声子的散射概率的变化分别是（ B ）。
- A. 变大，变小      B. 变小，变大      C. 变小，变小      D. 变大，变大
20. 与半导体相比较，绝缘体的价带电子激发到导带所需的能量（ A ）。
- A. 比半导体的大      B. 比半导体的小  
C. 与半导体的相等      D. 不确定
21. 一般半导体它的价带顶位于\_\_\_\_\_，而导带底位于\_\_\_\_\_。（ D ）
- A. 波矢  $k=0$  或附近，波矢  $k \neq 0$       B. 波矢  $k \neq 0$ ，波矢  $k=0$  或附近  
C. 波矢  $k=0$ ，波矢  $k \neq 0$       D. 波矢  $k=0$  或附近，波矢  $k \neq 0$  或  $k=0$
22. 锗的晶格结构和能带结构分别是（ C ）。
- A. 金刚石型和直接禁带型    B. 闪锌矿型和直接禁带型  
C. 金刚石型和间接禁带型    D. 闪锌矿型和间接禁带型
23. 如果杂质既有施主的作用又有受主的作用，则这种杂质称为（ D ）。
- A. 施主    B. 复合中心    C. 陷阱    D. 两性杂质
24. 杂质对于半导体导电性能有很大影响，下面哪两种杂质分别掺杂在硅中能显著地提高硅的导电性能（ C ）。
- A. 硼或铁    B. 铁或铜      C. 硼或磷      D. 金或银
25. 当施主能级  $E_D$  与费米能级  $E_F$  相等时，电离施主的浓度为施主浓度的（ C ）倍；
- A. 1      B.  $1/2$       C.  $1/3$       D.  $1/4$
26. 同一种施主杂质掺入甲、乙两种半导体，如果甲的相对介电常数  $\epsilon_r$  是乙的  $3/4$ ， $m_n^*/m_0$  值是乙的 2 倍，那么用类氢模型计算结果是（ D ）。

- A. 甲的施主杂质电离能是乙的  $8/3$ ，弱束缚电子基态轨道半径为乙的  $3/4$   
 B. 甲的施主杂质电离能是乙的  $3/2$ ，弱束缚电子基态轨道半径为乙的  $32/9$   
 C. 甲的施主杂质电离能是乙的  $16/3$ ，弱束缚电子基态轨道半径为乙的  $8/3$   
 D. 甲的施主杂质电离能是乙的  $32/9$ ，的弱束缚电子基态轨道半径为乙的  $3/8$

27. 本征半导体费米能级的表达式是\_\_\_\_\_。（ B ）

- A.  $\frac{E_c + E_v}{2} + \frac{k_0 T}{2} \ln \frac{N_D}{2N_c}$       B.  $\frac{E_c + E_v}{2} + \frac{k_0 T}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$   
 C.  $E_c + k_0 T \ln \frac{N_D}{N_c}$       D.  $\frac{E_c + E_v}{2}$

28. 载流子在电场作用下的运动为（ A ）。

- A. 漂移运动      B. 扩散运动      C. 热运动      D. 共有化运动

29. 下面情况下的材料中，室温时功函数最大的是（ A ）。

- A. 含硼  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的硅      B. 含磷  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  的硅  
 C. 含硼  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ，磷  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  的硅      D. 纯净的硅

30. 一般可以认为，在温度不很高时，能量大于费米能级的量子态基本上\_\_\_\_\_，而能量小于费米能级的量子态基本上为\_\_\_\_\_，而电子占据费米能级的概率在各种温度下总是\_\_\_\_\_，所以费米能级的位置比较直观地标志了电子占据量子态的情况，通常就说费米能级标志了电子填充能级的水平。（ A ）

- A. 没有被电子占据，电子所占据， $1/2$       B. 电子所占据，没有被电子占据， $1/2$   
 C. 没有被电子占据，电子所占据， $1/3$       D. 电子所占据，没有被电子占据， $1/3$

### 三. 简答题

1. 简要说明费米能级的定义、作用和影响因素。

答：电子在不同能量量子态上的统计分布概率遵循费米分布函数：

费米能级  $E_F$  是确定费米分布函数的一个重要物理参数，在绝对零度是，费米能级  $E_F$  反映了未占和被占量子态的能量分界线，在某有限温度时的费米能级  $E_F$  反映了量子态占据概率为二分之一时的能量位置。确定了一定温度下的费米能级  $E_F$  位置，电子在各量子态上的统计分布就可完全确定。

费米能级  $E_F$  的物理意义是处于热平衡状态的电子系统的化学势，即在不对外做功的情况下，系统中增加一个电子所引起的系统自由能的变化。

半导体中的费米能级  $E_F$  一般位于禁带内，具体位置和温度、导电类型及掺杂浓度有关。只有确定了费米能级  $E_F$  就可以统计得到半导体导带中的电子浓度和价带中的空穴浓度。

2. 在本征半导体中进行有意掺杂各种元素，可改变材料的电学性能。请解释什么是浅能级杂质、深能级杂质，它们分别影响半导体哪些主要性质；什么是杂质补偿杂质补偿的意义何在

答：浅能级杂质是指其杂质电离能远小于本征半导体的禁带宽度的杂质。它们电离后将成为带正电（电离施主）或带负电（电离受主）的离子，并同时向导带提供电子或向价带提供空穴。它可有效地提高半导体的导电能力。掺杂半导体又分为 n 型半导体和 p 型半导体。

深能级杂质是指杂质所在的能级位置在禁带中远离导带或价带，在常温下很难电离，不能对导带的电子或价带的空穴的浓度有所贡献，但它可以提供有效的复合中心，在光电子开关器件中有所应用。

当半导体中既有施主又有受主时，施主和受主将先互相抵消，剩余的杂质最后电离，这就是杂质补偿。

利用杂质补偿效应，可以根据需要改变半导体中某个区域的导电类型，制造各种器件。

3. 什么叫受主什么叫受主电离受主电离前后有何特征

答：半导体中掺入受主杂质后，受主电离后将成为带负电的离子，并同时向价带提供空穴，这种杂质就叫受主。

受主电离成为带负电的离子（中心）的过程就叫受主电离。

受主电离前不带电，电离后带负电。

4. 什么叫复合中心何谓间接复合过程有哪四个微观过程试说明每个微观过程和哪些参数有关。

答：半导体内的杂质和缺陷能够促进复合，称这些促进复合的杂质和缺陷为复合中心；

间接复合：非平衡载流子通过复合中心的复合；

四个微观过程：俘获电子，发射电子，俘获空穴，发射空穴；

俘获电子：和导带电子浓度和空穴复合中心浓度有关。

发射电子：和复合中心能级上的电子浓度。

俘获空穴：和复合中心能级上的电子浓度和价带空穴浓度有关。

发射空穴：和空的复合中心浓度有关。

5. 漂移运动和扩散运动有什么不同两者之间有什么联系

答：漂移运动是载流子在外电场的作用下发生的定向运动，而扩散运动是由于浓度分布不均匀导致载流子从浓度高的地方向浓度低的方向的定向运动。前者的推动力是外电场，后者的推动力则是载流子的分布引起的。

漂移运动与扩散运动之间通过迁移率与扩散系数相联系。而非简并半导体的迁移率与扩散系数则通过爱因斯坦关系相联系，二者的比值与温度成反比关系。即

6. 简要说明 pn 结空间电荷区如何形成？

答：当 p 型半导体和 n 型半导体结合形成 pn 结时，由于两者之间存在载流子浓度梯度，从而导致了空穴从 p 区到 n 区、电子从 n 区到 p 区的扩散运动。对于 p 区，空穴离开后留下了不可动的带负电荷的电离受主，因此在 p 区一侧出现了一个负电荷区；同理对于 n 区，电子离开后留下了不可动的带正电荷的电离施主，因此在 n 区一侧出现了一个正电荷区。这样带负电荷的电离受主和带正电荷的电离施主形成了一个空间电荷区，并产生了从 n 区指向 p 区的内建电场。

在内建电场作用下，载流子的漂移运动和扩散运动方向相反，内建电场阻碍载流子的扩散运动。随内建电场增强，载流子的扩散和漂移达到动态平衡。此时就形成了一定宽度的空间电荷区，并在空间电荷区两端产生了电势差，即 pn 结接触电势差。

7. 简要说明载流子有效质量的定义和作用。

答：能带中电子或空穴的有效质量  $m^*$  的定义式为：
$$m^* = \frac{h^2}{\frac{d^2 E(k)}{dk^2}}$$

有效质量  $m$  与能量函数  $E(k)$  对于波矢  $k$  的二次微商，即能带在某处的曲率成反比；能带越窄，曲率越小，有效质量越大，能带越宽，曲率越大，有效质量越小；

在能带顶部，曲率小于零，则有效质量为负值，在能带底部，曲率大于零，则有效质量为正值。

有效质量的意义在于它概括了内部势场的作用，使得在解决半导体中载流子在外场作用下的运动规律时，可以不涉及内部势场的作用。

8. 对于掺杂的元素半导体 Si、Ge 中，一般情形下对载流子的主要散射机构是什么？写出其主要散射机构所决定的散射几率和温度的关系。

答：对掺杂的元素半导体材料 Si、Ge，其主要的散射机构为长声学波散射和电离杂质散射

其散射几率和温度的关系为：

声学波散射： $p_s \propto T^{3/2}$ ，电离杂质散射： $p_i \propto N_i T^{-3/2}$

9. 说明能带中载流子迁移率的物理意义和作用。

答：载流子迁移率反映了单位电场强度下载流子的平均漂移速度，其定义式为：

$$\mu = \frac{|\bar{v}_d|}{|\bar{E}|}; \quad \text{其单位为：cm}^2/\text{Vs}$$

半导体载流子迁移率的计算公式为：

其大小与能带中载流子的有效质量成反比，与载流子连续两次散射间的平均自由时间成正比。确定了载流子迁移率和载流子浓度就可确定该载流子的电导率。

#### 四．证明题

1. 试推证：对于只含一种复合中心的间接带隙半导体晶体材料，在稳定条件下非平衡载流子的净复合率公式

证：

题中所述情况，主要是间接复合起作用，包含以下四个过程。

甲：电子俘获率= $r_n n (N_t - n_t)$

乙：电子产生率= $r_n n_i n_t$        $n_i = n_i \exp((E_t - E_i)/k_0 T)$

丙：空穴俘获率= $r_p p n_t$

丁：空穴产生率= $r_p p_i (N_t - n_t)$        $p_i = n_i \exp((E_i - E_t)/k_0 T)$

稳定情况下净复合率

$$U = \text{甲} - \text{乙} = \text{丙} - \text{丁} \quad (1)$$

稳定时

$$\text{甲} + \text{丁} = \text{丙} + \text{乙}$$

将四个过程的表达式代入上式解得

$$n_t = N_t \frac{n r_n + p_i r_p}{r_n (n + n_i) + r_p (p + p_i)} \quad (2)$$

将四个过程的表达式和（2）式代入（1）式整理得

$$U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i p_i)}{r_n (n + n_i) + r_p (p + p_i)} \quad (3)$$

由  $p_1$  和  $n_1$  的表达式可知  $p_1 n_1 = n_i^2$  代入上式可得

2. 试用一维非均匀掺杂（掺杂浓度随  $x$  的增加而下降），非简并 p 型半导体模型导出爱

因斯坦关系式：
$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_o T}{q}$$

证明：由于掺杂浓度不均匀，电离后空穴浓度也不均匀，形成扩散电流：

空穴向右扩散的结果，使得左边带负电，右边带正电，形成反  $x$  方向的自建电场  $E$ ，产生漂移电流：

稳定时两者之和为零，即：

而  $E = -\frac{dV}{dx}$ ，有电场存在时，在各处产生附加势能  $-qV(x)$ ，使得能带发生倾斜。

在  $x$  处的价带顶为： $E_v(x) = E_v - qV(x)$ ，则  $x$  处的空穴浓度为：

$$\text{则： } \frac{dp_0}{dx} = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v + qV(x)}{k_o T}\right) \left(-\frac{q}{k_o T} \frac{dV}{dx}\right)$$

$$\text{故： } qD_p p_0 \frac{q}{k_o T} \frac{dV}{dx} - q\mu_p p_0 \frac{dV}{dx} = 0$$

3. 证明非平衡载流子的寿命满足  $\Delta p(t) = \Delta p_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ ，并说明式中各项的物理意义。

证明：

则在单位时间内减少的非平衡载流子数=在单位时间内复合的非平衡载流子数，即  
在小注入条件下， $\tau$  为常数，解方程（1），得到

式中， $\Delta p(0)$  为  $t=0$  时刻的非平衡载流子浓度。此式表达了非平衡载流子随时间呈指数衰减的规律。得证。